

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

М.А. Трофимов*, Е.Г. Мурачев*, А.А. Рогоза, Н.Д. Егупов****

* *Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ*

249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1

** *Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана*

248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2.



Рассматривается построение математической модели электрогидравлической системы автоматического регулирования изделия Т-63-13,0/0,25 производства ОАО «Калужский турбинный завод». Изделие относится к теплофикационным паровым турбоагрегатам нового поколения единичной мощностью до 55 МВт для непосредственного привода электрических генераторов и комбинированной выработки тепловой и электрической энергии. Может использоваться в схемах с утилизацией тепла или отходов основного технологического производства. Математическое моделирование систем регулирования позволяет значительно улучшить качество регулирования, т.е. точность и надежность таких систем, ускорить разработку и расчёт как самой системы регулирования, так и параметров её отдельных элементов. Математическая модель САР ПТ Т-63-13,0/0,25 позволяет оценить влияние конструктивных параметров при любом сбросе нагрузки (от 0 до 100%), а также качество регулирования контролируемых параметров при работе как в изолированную электрическую сеть (выходная мощность генератора, частота), так и в общую (выходная мощность генератора). В алгоритмах разработано математическое представление блоков регулирования, модели турбины, электронной управляющей части каждого из блоков регулирования. Предложено для управления синхронными двигателями применить широтно-импульсную модуляцию, позволяющую управлять частотой вращения вала синхронной машины путём изменения частоты питающего напряжения. Для этих целей в модели системы управления используется преобразователь частоты, который предлагается применить в реальной системе управления. Разработанная система регулирования с одним регулируемым отбором пара в турбине Т-63-13,0/0,25 выполнена связанной и автономной, т.е. каждый из двух измерителей регулируемых параметров турбины воздействует на обе системы парораспределения так, чтобы отклонение одного из регулируемых параметров не приводило к возмущениям в другом.

Ключевые слова: энергетическая турбина, математическая модель, нелинейная система автоматического регулирования, устойчивость процесса регулирования, алгоритм управления.

ВВЕДЕНИЕ

При изучении динамических характеристик систем автоматического регулирования (САР) энергетических турбин особое значение имеют математические методы. Они являются не только основой аналитических методов, но и становятся составной частью экспериментальных исследований. Непременным условием успеха при этом должно быть построение математических моделей, корректно отражающих динамические свойства элементов. Математическая модель позволяет определить количественные показатели качества регулирования турбин, что является ответственной задачей, так как без знания этих показателей нельзя ни эксплуатировать существующие САР (и, следовательно, турбины, которыми они оснащены), ни разрабатывать новые системы. Математическое моделирование позволяет значительно улучшить качество регулирования, т.е. точность и надёжность таких систем, а также значительно ускорить разработку и расчёт САР и параметров её отдельных элементов. Желательно, чтобы уровень сложности модели не превышал требуемых для данного вида исследований. При построении модели исследователь всегда исходит из поставленных целей, учитывая только наиболее существенные для их достижения факты. Поэтому любая модель нетождественна объекту-оригиналу и, следовательно, неполна, поскольку при её построении исследователь учитывает лишь важнейшие с его точки зрения факторы.

Математическая модель системы регулирования турбины важна для выявления на этапе конструкторских разработок влияния таких конструктивных параметров исполнительных элементов САР, как постоянных времени сервомоторов, площадей окон отсечных золотников и других элементов на качество переходных процессов, а также

- проверки устойчивости процесса регулирования турбогенератора;
- выяснения динамических качеств системы регулирования при сбросах нагрузки

(динамические забросы для звеньев системы регулирования, длительность переходного процесса и пр.).

Поставленные задачи позволяют оценить эффективность работы САР, а также надёжность системы в условиях длительной эксплуатации.

СОСТАВЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЯ Т-63-13,0/0,25.

В подавляющем большинстве случаев паровые турбины (ПТ) в энергетике используются в качестве первичных двигателей для привода синхронных электрических генераторов. Так как вырабатываемая электрическая энергия нигде в энергосистеме не аккумулируется, то её производство в любой момент времени должно соответствовать потреблению. Критерием этого соответствия является постоянство частоты сети – параметра, значение которого в установившемся режиме одинаково для любой точки энергосистемы. Номинальное значение частоты сети в России равно 50 Гц, и должно поддерживаться с высокой точностью [1 – 3].

Основной задачей, рассматриваемой в статье, является построение модели САР с объектом регулирования для выяснения влияния конструктивных параметров на динамику ПТ; фактически это относится к задаче анализа замкнутой САР ПТ.

Задачей анализа замкнутой нелинейной системы автоматического регулирования является определение характеристик выходного сигнала (переходного процесса) или сигнала ошибки.

Следует отметить, что как при анализе, так и при синтезе систем регулирования ПТ вводятся некоторые допущения, т.е. рассматривается наиболее значимый режим – 100%-й сброс электрической нагрузки. В указанном режиме не должна срабатывать защита, при которой стопорные клапаны прекращают подачу пара на турбину. Если САР ПТ отработывает этот режим, то полагают, что система регулирования функционирует нормально [4].

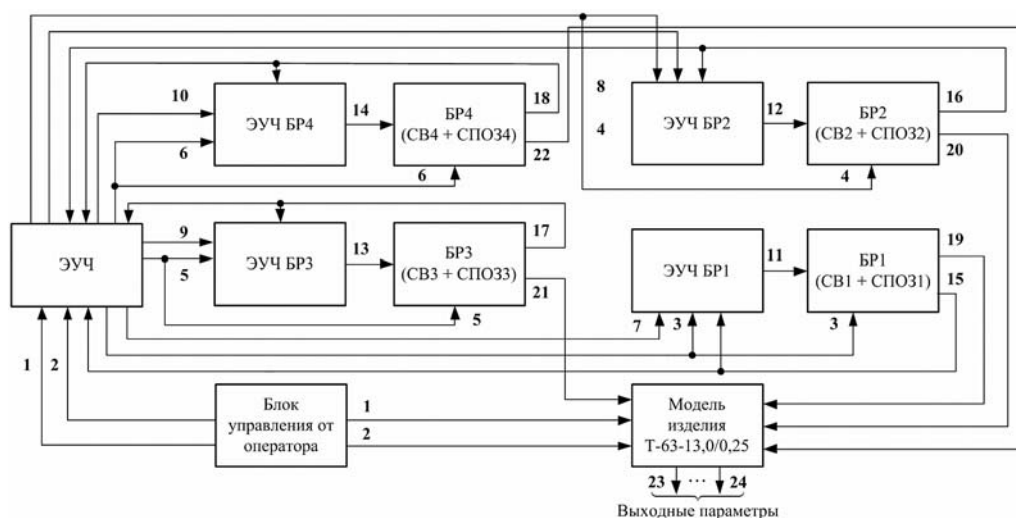


Рис. 1. Функциональная схема системы автоматического регулирования изделия Т-63-13,0/0,25 (конденсационный режим)

Составлена математическая модель САР ПТ Т-63-13,0/0,25, позволяющая оценить влияние конструктивных параметров при любом сбросе нагрузки (от 0 до 100%), а также качество регулирования контролируемых параметров при работе как в изолированную электрическую сеть (выходная мощность генератора, частота), так и в общую (выходная мощность генератора). Математическая модель САР в функциональном виде представлена на рис. 1.

Математическая модель состоит из следующих основных узлов.

1. Блоки регулирования (БР1 – БР4).
2. Блок управления от оператора.
3. Модель изделия Т-63-13,0/0,25.
4. Электронная управляющая часть каждого из блоков регулирования (ЭУЧ БР1 – ЭУЧ БР4).
5. Электронная управляющая часть (ЭУЧ).

Указанные в пунктах 4 и 5 блоки составляют общую структуру ЭУЧ электрогидравлической системы автоматического регулирования (ЭГСАР).

Блок регулирования. Конструктивно БР содержит в своем составе гидравлический сервомотор (СМ) и устройство управления – следящий привод отсечного золотника (СПОЗ). БР предназначен для перемещения штока СМ и жёстко связанного с ним клапана регулирования пара (КРП) в соответствии с законом, определяемым ЭУЧ ЭГСАР. Все четыре блока регулирования БР1 – БР4 являются одинаковыми.

Блок управления от оператора. Выполняет роль задающего устройства. В данном блоке задается выходная мощность генератора в виде «уставки» или закон её изменения [1, 2], а также режим работы – изолированная либо общая электрическая сеть.

Модель изделия Т-63-13,0/0,25. Математическая модель объекта управления – изделие Т-63-13,0/0,25 (конденсационный режим работы).

Электронная управляющая часть блока регулирования. Выполняет следующие функции:

- преобразование сигнала управления ЭУЧ в сигнал для управления СПОЗ (управление по напряжению или току, соответствие амплитуды сигнала и т.д., что оговорено техническим заданием [2]);
- управление БР1 – БР4 при сбросе нагрузки.

Электронная управляющая часть. В данном блоке ЭУЧ ЭГСАР реализован алгоритм

управления изделием Т-63-13,0/0,25. В его задачи входят

- выдача в электросеть требуемой электрической мощности, заданной «уставкой»;
- поддержание заданной «уставки» электрической мощности турбогенератора при отклонениях от номинальных параметров пара перед турбиной (работа в общую электросеть);
- поддержание заданной «уставки» электрической мощности турбогенератора при отклонениях от номинальных параметров пара перед турбиной (работа в изолированную электросеть);
- поддержание требуемой частоты вращения ПТ Т-63-13,0/0,25 при колебаниях электрической нагрузки со стороны потребителей (работа в изолированную электросеть);
- управление турбогенератором при сбросе нагрузки от 0 до 100%.

Схема управления приводом отсечного золотника. В современных электроприводах для управления синхронными двигателями все шире используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ), позволяющая с помощью микроконтроллера осуществлять питание трёхфазного двигателя от источников постоянного тока [4]. Управление частотой вращения вала синхронной машины можно добиться путём изменения частоты питающего напряжения. Для увеличения частоты вращения вала необходимо повысить частоту питающего напряжения, для уменьшения – понизить. Для этих целей служит ПЧ.

Конструктивно ПЧ, как правило, состоит из следующих основных функциональных узлов: выпрямитель напряжения (ВН); СК – силовые ключи; модуль, реализующий ШИМ.

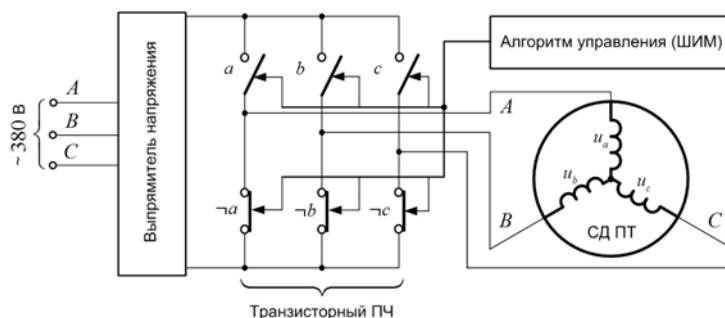


Рис. 2. Схема питания синхронного двигателя ПТ

Векторная ШИМ рассматривается как специальная схема, включающая в себя шесть мощных транзисторов трехфазного преобразователя, работающих в ключевом режиме. Схема такого преобразователя, питающая трёхфазный синхронный двигатель, имеет вид, показанный на рис. 2, где введены следующие обозначения: $a, -a, b, -b, c, -c$ – логические переменные замыкания соответствующих ключей СК; u_a, u_b, u_c – фазные напряжения.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗДЕЛИЯ Т-63-13,0/0,25

Математическая модель Т-63-13,0/0,25 представлена на рис. 3 в виде структурной схемы. В модели отсутствует конденсатор, отработанный пар с выхлопного тракта ПТ поступает в условный граничный узел, однако этот факт не влияет на адекватность результатов моделирования в рамках рассматриваемой задачи [5, 6]. В статье не рассматриваются принцип работы и описание модели. Следует отметить, что моделирование возмущающих воздействий, приводящих к отклонениям от номинала выходной электрической мощности ТГ, а в случае работы в изолированную электросеть – и к частоте вращения ПТ, представляет собой сложную задачу. Фактически необходимо смоделировать нагрузку со стороны как электропотребителя, так и отклонения параметров пара от номинальных [7 – 9].

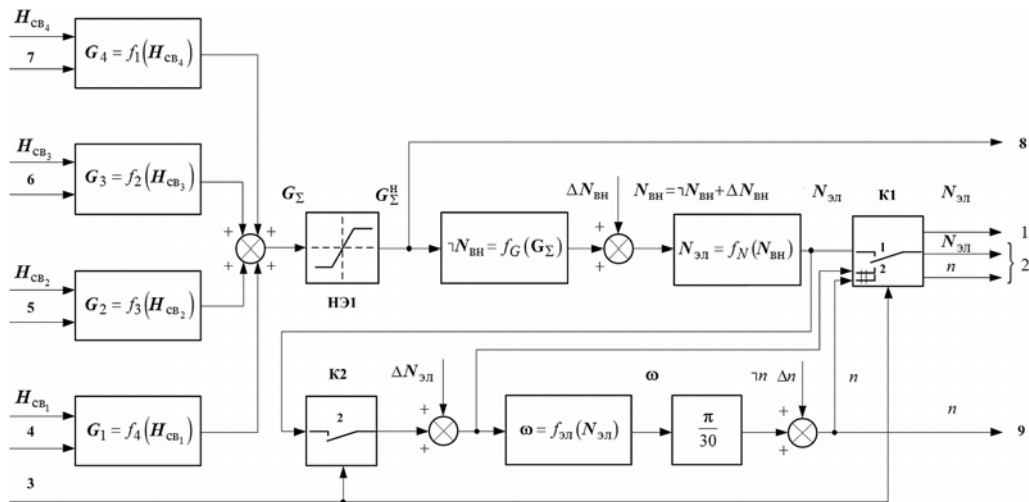


Рис. 3. Структурная схема изделия Т-63-13,0/0,25

На входы четырёх блоков $G_i = f_i(H_{CBi})$ ($i = 1, \dots, 4$) поступают сигналы с БР1 – БР4, соответствующие перемещению штоков СМ $H_{CB1} - H_{CB4}$, мм. В указанных блоках происходит преобразование сигналов $H_{CB1} - H_{CB4}$ в величину, характеризующую расход пара через каждый БР. Сигналы 4 – 7 служат для коррекции математической модели и отражают потери расхода пара через клапаны регулирования пара КРП1 – КРП4. Сигнал 3 используется для выбора режима работы.

- Если сигнал присутствует (в модели равен 1 – задается оператором с пульта управления), то ключ К2 замыкается, а ключ К1 переходит в состояние 2, что соответствует режиму работы в изолированную электросеть. При этом контролируемые параметрами являются $N_{эл}$ – выходная электрическая мощность турбогенератора, МВт; n – частота вращения ПТ, об/мин.

- Если сигнал отсутствует (равен 0), то ключ К2 разомкнут, а К1 находится в состоянии 1; при этом нижняя ветвь в схеме отключена – режим работы в общую электросеть. Контролируемым параметром является $N_{эл}$ – выходная электрическая мощность турбогенератора, МВт.

Сложность моделирования возмущающих воздействий, возникающих при работе как в изолированную электрическую сеть, так и в общую, отмечена и в [14]. В предлагаемой структурной схеме (см. рис. 3) для решения проблемы возмущающие воздействия представлены в виде отдельных входов: $\Delta N_{ВН}$ – возмущение по внутренней мощности ПТ (отклонение параметров пара и т.д.); Δn – возмущение по частоте вращения ПТ (нагрузка со стороны потребителя).

Поддержание контролируемых параметров достигается путём регулирования подачи пара на ПТ, что обеспечивается в ЭГСАР БР, задачей которых является регулирование подачи пара на ПТ при колебаниях $N_{ВН}$ и Δn , а также обеспечение требуемого расхода пара при заданной электрической мощности в сеть.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОННОЙ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ЧАСТИ БР (ЭУЧ БР)

Функциональная схема ЭУЧ БР1 представлена на рис. 4 [10 – 12]. Математическая модель ЭУЧ БР состоит из двух компонентов – модели БР и модели устройства управления БР (УУ БР).

Рассмотрим кратко математическую модель и принцип работы УУ БР на примере структурной схемы устройства управления первого блока регулирования,

представленной на рис. 5.

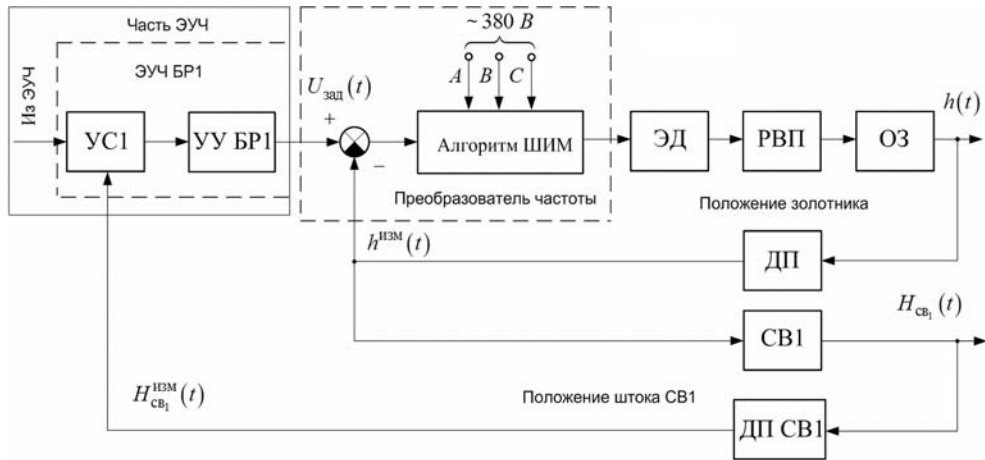


Рис. 4. Функциональная схема блока регулирования БР1 с устройством управления УУ БР1

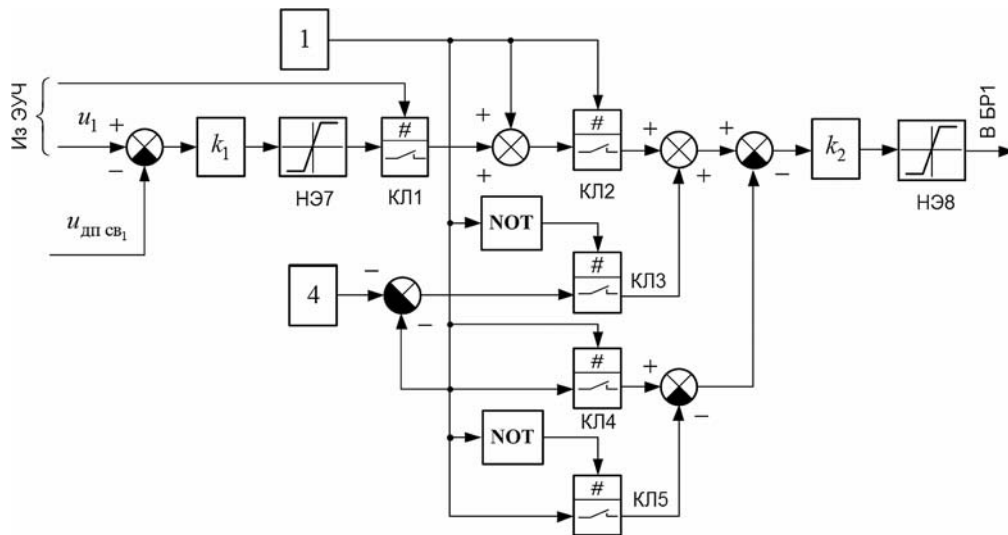


Рис. 5. Структурная схема устройства управления блока регулирования БР1

Сигнал, поступающий на ключ КЛ1, говорит о том, что данный БР включен в работу. При частичном или полном сбросе нагрузки некоторые БР срабатывают на полное закрытие клапанов регулирования пара, количество которых определяется алгоритмом «прошитым» в ЭУЧ. Как только приходит сигнал срабатывания на полное закрытие КРП, ключ КЛ1 размыкается; в этом случае выходной сигнал блока УУ БР определяется величиной «уставки», равной 4 В. Данная «уставка» берется с отрицательным знаком, что связано с введённой для упрощения модели БР условной координатной сеткой. Принято, что перемещение отсечного золотника (ОЗ) на закрытие соответствует отрицательному входному сигналу с ЭУЧ, на открытие – положительному. Соответственно при перемещении ОЗ на закрытие шток сервомотора выдвигается, что соответствует перекрытию подачи пара, в обратном случае – открытие КРП. Такое допущение связано с особенностью конструкторской реализации БР – с заполнением и опорожнением обеих полостей СМ при регулировании. Величина «уставки» определена из следующих соображений: в соответствии с технической документацией [1] сигнал управления, посту-

пающий на СПОЗ, изменяется по напряжению в пределах от 1 до 5 В (диапазон изменения – 4 В). Аналогичным образом проводится преобразование, если управление строится по токовому сигналу (4 – 20 мА).

Коэффициенты k_1 и k_2 являются масштабными – они определяют координатную сетку. Коэффициент k_2 служит для восстановления сигнала управления, поступающего на СПОЗ в диапазоне по напряжению 1 – 5 В (повышающий коэффициент).

Алгоритм коммутации БР. Последовательность открытия четырёх регулирующих клапанов КРП1 – КРП4 части (цилиндра) высокого давления (ЧВД) производится соответствующими СМ в соответствии с расходной характеристикой, представленной на рис. 6.

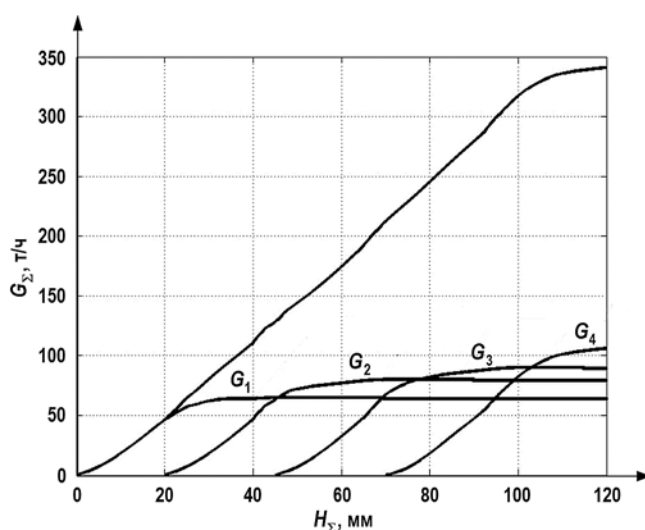


Рис. 6. Графики зависимостей расходов пара через регулирующие клапаны КРП1 – КРП4 ЧВД от их хода

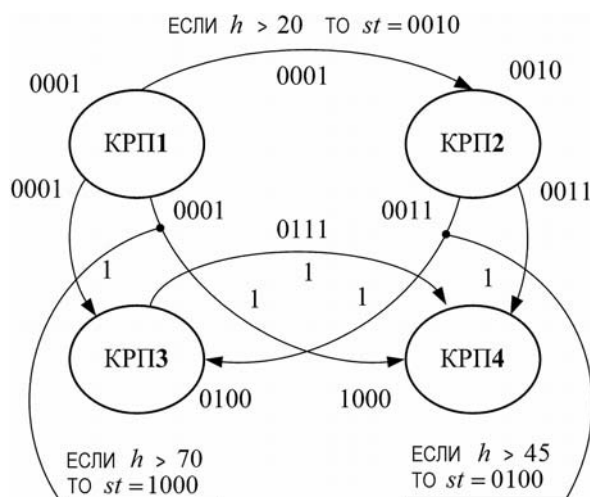


Рис. 7. Диаграмма состояний регулирующих клапанов КРП1 – КРП4 при регулировании подачи пара на ПТ Т-63-13,0/0,25

В процессе проектирования и пусконаладочных работ последовательность и величина открытия и хода клапанов может корректироваться, что предусмотрено алгоритмом управления турбоагрегатом. В этот алгоритм входит фрагмент программы, который обеспечивает коммутацию БР в зависимости от суммарного расхода пара на турбину и

выходной электрической мощности, задаваемой оператором.

Алгоритм коммутации БР реализован в модели в виде блока, условно названного блоком принятия решения (БПР). В его задачи входит

- определение активных БР для регулирования подачи пара;
- последовательное включение БР во время разгона ТГ до требуемой выходной электрической мощности в соответствии с уставкой;
- связь БР1 – БР4 с алгоритмом управления изделием.

На основании табличных данных состояний КРП была составлена совершенная дизъюнктивная нормальная форма (СДНФ) конечного автомата – логическая последовательность, отражающая принцип работы БПР. Рисунок 7 представляет графическую интерпретацию СДНФ.

Интеграция моделей, составление единой математической модели ЭГСАР с объектом регулирования. Интеграция моделей – это объединение представленных выше моделей отдельных модулей и узлов в единую математическую модель. Такой способ рассмотрения был необходим для простоты отладки расчётных схем [16 – 19].

Математическая модель ЭГСАР включает в себя [20]

- математические модели исполнительных органов САР (модели БР1 – БР4 и модель изделия Т-63-13,0/0,25);
- математическую модель ЭУЧ (УУ ЭУЧ, БПР и алгоритм управления изделием);
- модель возмущающих воздействий (по частоте вращения ПТ – $\Delta\omega$; по внутренней мощности ПТ – $\Delta N_{вн}$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель системы автоматического регулирования паровой турбиной позволяет учесть различные возмущающие воздействия в ходе испытаний и эксплуатации данного изделия. Система регулирования с одним регулируемым отбором пара в ПТ Т-63-13,0/0,25 выполнена связанной и автономной, т.е. каждый из двух измерителей регулируемых параметров турбины воздействует на обе системы парораспределения таким образом, чтобы отклонение одного из регулируемых параметров не приводило к возмущениям в другом.

Литература

1. Паротурбинная установка Т-63-13,0/0,25. Перечень контролируемых параметров. 102-М-01192. – Калуга: ОАО «Калужский турбинный завод», 2008. – 33 с.
2. Технические требования на оснащение паровой турбины Т-63-13,0/0,25 производства ОАО «КТЗ» электронной управляющей частью электрогидравлической системы автоматического регулирования. 101-М-01765ТТ. – Калуга: ОАО «Калужский турбинный завод», 2008. – 56 с.
3. Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Математические модели элементов электроэнергетических систем в расчётах установившихся режимов и переходных процессов. – Томск: Томский политехнический университет, 2010. – 115 с.
4. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2008. – 298 с.
5. Егупов Н.Д., Пупков К.А., Рогоза А.А., Трофимов М.А. Алгоритмическая теория систем управления, основанная на спектральных методах. В двух томах. Том 2. Матрично-вычислительные технологии на базе интегральных уравнений. / Под ред. В.А. Матвеева. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 464 с.
6. Трофимов А.И., Трофимов М.А., Рогоза А.А., Егупов Н.Д. Результаты испытаний паротурбинной установки плавучей атомной станции. // Тяжелое машиностроение. – 2013. – № 10. – С. 20-23.
7. Rutly B. Multiple Scattering Theory and Integral Equations. Integral Methods in Science and Engineering. / Eds. C. Constanda, M. Ahues, and A. Largillier. – Boston:

- Birkhauser, 2004. – PP. 211-232. DOI: https://doi.org/10.1007/978-0-8176-8184-5_34.
8. *Amosov A., Panasenko G.* Asymptotic Analysis and Asymptotic Domain Decomposition for an Integral Equation of the Radiative Transfer Type. // *J. Math. Pures Appl.* – 2005. – Vol. 84. – PP. 1813-1831. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpur.2005.01.005>.
9. *Nunes A.L., Vasconcelos P.B., Ahues M.* Error Bounds for Low-Rank Approximations of the First Exponential Integral Kernel. // *Numerical Functional Analysis and Optimization.* – 2013. – Vol. 34. – No. 1. – PP. 74-93. DOI: <https://doi.org/10.1080/01630563.2012.707866>.
10. *Трофимов М.А., Рогоза А.А.* Алгоритм синтеза робастных регуляторов для нелинейных систем с параметрической неопределенностью основанный на проекционно-матричных методах. // *Научно-технический вестник Поволжья.* – 2013. – № 4. – С. 244-246.
11. *Пупков К.А., Егунов Н.Д., Макаренков А.М., Трофимов А.И.* Теория и компьютерные методы исследования стохастических систем. – М.: Физматлит, 2003. – 400 с.
12. *Amosov A., Panasenko G., Rutily B.* An Approximate Solution to the Integral Radiative Transfer Equation in an Optically Thick Slab. // *C. R. Acad. Sci. Paris. Ser. Mecanique.* – 2003. – Vol. 331. – PP. 823-828. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crme.2003.09.007>.
13. *Rutily B., Chevallier L.* The Nite Laplace Transform for Solving a Weakly Singular Integral Equation Occurring in Transfer Theory. // *Journal of Integral Equations and Applications.* – 2004. – Vol. 16. – No. 4. – PP. 389-409. DOI: <https://doi.org/10.1216/jiea/1181075298>.
14. *Татарина Н.В., Эфрос Е.И., Сущих В.М.* Результаты расчета на математических моделях переменных режимов работы теплофикационных паротурбинных установок в реальных условиях эксплуатации. // *Перспективы науки.* – 2014. – № 3 (54). – С. 95-100.
15. *Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П.* Справочник по теплогидравлическим расчетам: Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы. / Под общ. ред. П.Л. Кириллова. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 296 с.
16. *D'Almeida F.D., Ahues M., Fernandes R.* Errors and Grids for Projected Weakly Singular Integral Equations. // *Int. J. Pure Appl. Math.* – 2013. – Vol. 89. – No. 2. – PP. 203-213. DOI: <https://doi.org/10.12732/ijpam.v89i2.6>.
17. *Марчук Г.И., Агошков В.И.* Введение в проекционно-сеточные методы. – М.: Наука. Физматлит, 1981. – 416 с.
18. *Канторович Л.В.* Функциональный анализ и прикладная математика. // *УМН.* – 1948. – Т. 3. – Вып. 6 (28). – С. 89-185.
19. *Казанцев А.А.* Модель ступени турбины. // *Известия вузов. Ядерная энергетика.* – 2009. – № 3. – С. 208-216. Электронный ресурс: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2009/03.pdf> (дата доступа 29.06.2021).
20. *Корнюшин Ю.П., Мельников Д.В., Егунов Н.Д., Корнюшин П.Ю.* Синтез дополнительного регулятора для стабилизации угловой скорости ротора паровой турбины. // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: «Естественные науки».* – 2015. – № 5 (62). Электронный ресурс: <http://vestniken.ru/articles/657/657.pdf> (дата доступа 29.06.2021). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2015-5-100-112>.

Поступила в редакцию 09.07.2021 г.

Авторы

Трофимов Максим Адольфович, профессор, д.т.н.
E-mail: trofimovma@mail.ru

Мурачѐв Евгений Григорьевич, доцент, к.т.н.
E-mail: profmur@mail.ru

Рогоза Александр Анатольевич, аспирант
E-mail: aemaetheternity@mail.ru

Егунов Николай Дмитриевич, профессор, д.т.н.
E-mail: dan@ipu.ru

MATHEMATICAL SIMULATION OF AN AUTOMATIC STEAM TURBINE CONTROL SYSTEMTrofimov M.A.*, Murachov E.G.*, Rogoza A.A.**, Egupov N.D.**

* Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, MEPhI

1 Studgorodok, 249040 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

** Kaluga Branch of the N.E. Bauman Moscow State Technical University

2 Bazhenov Str., 248000 Kaluga, Russia

ABSTRACT

The paper considers the construction of a mathematical model for an electrohydraulic system to control automatically the T-63-13,0/0,25 product manufactured by JSC Kaluga Turbine Plant. Mathematical simulation of control systems makes it possible to improve considerably the quality of control, that is, the accuracy and reliability of such systems, as well as to accelerate greatly the development and calculation of the control system and the parameters of its individual components. The T-63-13,0/0,25 mathematical model of the ASTCS allows estimating the effects of design parameters during any load dropping (in a range of 0 to 100%) and the quality of control for the monitored parameters both in the process of operation as part of an isolated power system (generator output, frequency) and an integrated power system (generator output). A mathematical representation has been developed in the model for the control units, the T-63-13,0/0,25 product model, and the electronic controlling part of each of the control units. It has been proposed that pulse-width modulation be used to control the synchronous motors which makes it possible to control the synchronous machine shaft speed by changing the supply voltage frequency. To this end, the control system's model uses a frequency converter which is proposed to be used in the real control system. The developed control system with one adjustable steam extraction in the T-63-13,0/0,25 steam turbine is coupled and autonomous, that is, each of the two meters for the turbine's controlled parameters has effect on both steam distribution systems such that a deviation for one of the controlled parameters does not lead to excitations in the other.

Key words: power turbine, mathematical model, nonlinear automatic control system, stability of control process, control algorithm.

REFERENCES

1. *Steam Turbine Unit T-63-13.0/0.25. List of Monitored Parameters. 102-M-01192.* Kaluga. Kaluga Turbine Works JSC, 2008, 33 p. (in Russian).
2. *Technical Requirements for Equipping a Steam Turbine T-63-13.0/0.25 Manufactured by KTZ JSC with an Electronic Control Part Of an Electro-Hydraulic Automatic Control System. 101-M-01765TT.* Kaluga. Kaluga Turbine Works JSC, 2008, 56 p. (in Russian).
3. Weinstein R.A., Kolomiets N.V., Shestakova V.V. *Mathematical Models of Elements of Electric Power Systems in the Calculations of Steady-State Modes and Transient Processes.* Tomsk. Tomsky Polytekhnicheskyy Universitet Publ., 2010, 115 p. (in Russian).
4. Vinogradov A.B. *Vector Control of AC Electric Drives.* Ivanovo. Ivanovsky Gosudarstvenny Energetichesky Universitet n.a. V.I. Lenin Publ., 2008, 298 p. (in Russian).
5. Egupov N.D., Pupkov K.A., Rogoza A.A., Trofimov M.A. *Algorithmic Theory of Control Systems based on Spectral Methods. Vol. 2. Matrix Computing Technologies Based on Integral Equations.* Ed. Matveeva V.A. Moscow. N.E. Bauman MGTU Publ., 2014, 464 p. (in Russian).
6. Trofimov A.I., Trofimov M.A., Rogoza A.A., Egupov N.D. Results of Tests of a Steam-

Turbine Installation of a Floating NPP. *Tyazhyoloye Mashinostroyeniye*. 2013, no. 10, pp. 20-23 (in Russian).

7. Rutily B. *Multiple Scattering Theory and Integral Equations. Integral Methods in Science and Engineering*. Eds. C. Constanda, M. Ahues, and A. Largillier. Birkhauser, Boston, 2004, pp. 211-232; DOI: https://doi.org/10.1007/978-0-8176-8184-5_34.

8. Amosov A., Panasenko G. Asymptotic Analysis and Asymptotic Domain Decomposition for an Integral Equation of the Radiative Transfer Type. *J. Math. Pures Appl.* 2005, v. 84, pp. 1813-1831; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpur.2005.01.005>.

9. Nunes A.L., Vasconcelos P.B., Ahues M. Error Bounds for Low-Rank Approximations of the First Exponential Integral Kernel. *Numerical Functional Analysis and Optimization*. 2013, v. 34, no. 1, pp. 74-93; DOI: <https://doi.org/10.1080/01630563.2012.707866>.

10. Trofimov M.A., Rogoza A.A. Algorithm for the Synthesis of Robust Controllers for Nonlinear Systems with Parametric Uncertainty Based on Projection-Matrix Methods. *Nauchno-Tekhnichesky Vestnik Povolzh'ya*. 2013, no. 4, pp. 244-246 (in Russian).

11. Pupkov K.A., Egupov N.D., Makarenkov A.M., Trofimov A.I. *Theory and Computer Methods for Studying Stochastic Systems*. Moscow. Fizmatlit Publ., 2003, 400 p. (in Russian).

12. Amosov A., Panasenko G., Rutily B. An Approximate Solution to the Integral Radiative Transfer Equation in an Optically Thick Slab. *C. R. Acad. Sci. Paris. Ser. Mecanique*. 2003, v. 331, pp. 823-828; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crme.2003.09.007>.

13. Rutily B., Chevallier L. The Nite Laplace Transform for Solving a Weakly Singular Integral Equation Occurring in Transfer Theory. *Journal of Integral Equations and Applications*. 2004, v. 16, no. 4, pp. 389-409; DOI: <https://doi.org/10.1216/jiea/1181075298>.

14. Tatarinova N.V., Efros E.I., Sushchikh V.M. Results of Calculation on Mathematical Models of Variable Operating Modes of Cogeneration Steam Turbine Plants in Real Operating Conditions. *Perspektivy Nauki*. 2014, no. 3 (54), pp. 95-100 (in Russian).

15. Kirillov P.L., Yuryev Yu.S., Bobkov V.P. *Handbook of Thermohydraulic Calculations: Nuclear Reactors, Heat Exchangers, Steam Generators*. Ed. P.L. Kirillov. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1984, 296 p. (in Russian).

16. D'Almeida F.D., Ahues M., Fernandes R. Errors and Grids for Projected Weakly Singular Integral Equations. *Int. J. Pure Appl. Math.* 2013, v. 89, no. 2, pp. 203-213; DOI: <https://doi.org/10.12732/ijpam.v89i2.6>.

17. Marchuk G.I., Agoshkov V.I. *Introduction to Projection-Grid Methods*. Moscow. Nauka. Fizmatlit Publ., 1981, 416 p. (in Russian).

18. Kantorovich L.V. Functional Analysis and Applied Mathematics. *Uspekhi Matematicheskikh Nauk*. 1948, v. 3, iss. 6 (28), pp. 89-185 (in Russian).

19. Kazantsev A.A. Turbine Stage Model. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. – 2009, no. 3, pp. 208-216. Available at: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/journals/2009/03.pdf> (accessed Jun. 29, 2021) (in Russian).

20. Korniyushin Yu.P., Melnikov D.V., Egupov N.D., Korniyushin P.Yu. Synthesis of an Additional Regulator for Stabilizing the Angular Velocity of a Steam Turbine Rotor. *Vestnik N.E. Bauman MGTU. Ser. Estestvennye Nauki*. 2015, no. 5 (62); DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2015-5-100-112> (in Russian).

Authors

Trofimov Maksim Adol'fovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: trofimovma@mail.ru

Murachyov Evgeny Grigorievich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: profmur@mail.ru

Rogoza Aleksandr Anatolievich, PhD Student

E-mail: aemaetheternity@mail.ru

Egupov Nikolay Dmitrievich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: dan@ipu.ru